

## 合金化 ZG40Cr25Ni20 钢固溶组织及性能的研究

路王珂 周文倩 孙玉福 于根杰

(中原科技学院机电工程学院)

**摘要** 对含质量分数为 5% 的 Al、0.6% 的 Ti、0.6% 的 W 的 ZG40Cr25Ni20 钢固溶态组织及性能进行研究。结果表明,合金元素的加入使得 ZG40Cr25Ni20 室温抗拉强度有所升高,伸长率下降至未加入时的 11% 左右,表现为脆性断裂,但是高温伸长率显著提高,拉伸断口存在较多的韧窝及撕裂棱等,表现出较好的高温韧性。随着 Al、Ti 和 W 元素加入,经 1 200 °C × 5 h 油冷后,由于高硬度及高稳定性的 Ni<sub>3</sub>Al 相及 TiC、WC 微粒的形成,硬度进一步增大,室温及 600 °C 下干摩擦的耐磨性均有所提高。

**关键词** ZG40Cr25Ni20;合金化;固溶处理;硬度;耐磨性

**中图分类号** TG142.71;TG146.2

**文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2022.07.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Microstructure and Properties of Alloying ZG40Cr25Ni20 Steel after Solution Treatment

Lu Wangke, Zhou Wenqian, Sun Yufu, Yu Genjie

(School of Electro-mechanical Engineering, Zhongyuan Institute of Science and Technology)

**Abstract:** The microstructure and properties of ZG40Cr25Ni20 steel with 5% Al, 0.6% Ti and 0.6% W after solution treatment were investigated. The results indicate that the tensile strength of ZG40Cr25Ni20 is increased with the addition of alloying elements, and the elongation is decreased to about 11% of the ones before addition, which presents brittle fracture. However, the high temperature elongation is increased significantly with many dimples and tearing edges existing on the tensile fracture surface, and high toughness at high temperature is presented. With the addition of Al, Ti and W elements, after 1 200 °C × 5 h oil cooled, the hardness is increased further due to the formation of Ni<sub>3</sub>Al phase and TiC and WC particles with high hardness and high stability, where the wear-resistance at room temperature and 600 °C dry friction condition are improved.

**Key Words:** ZG40Cr25Ni20, Alloying, Solution Treatment Microstructures, Hardness, Wear-resistance

ZG40Cr25Ni20 合金钢广泛用于建材、电力、冶金等行业。在高温氧化性气氛及磨料磨损条件下工作的

零部件,要求较高的高温强度和良好的抗氧化性及一定的耐磨性,以满足使用性能要求<sup>[1]</sup>。ZG40Cr25Ni20 合

**收稿日期:**2021-12-07;**修改稿收到日期:**2022-02-09

**基金项目:**河南省科技攻关项目(172102210122)

**第一作者简介:**路王珂,女,1988 年出生,硕士研究生,郑州(450000),E-mail:454481824@qq.com

**通信作者:**孙玉福,男,1958 年出生,教授,郑州(450000),E-mail:yufusun@22u.edu.cn

**引用格式:**路王珂,周文倩,孙玉福,等.合金化 ZG40Cr25Ni20 钢固溶组织及性能的研究[J].特种铸造及有色合金,2022,42(7):903-906.

LU W K, ZHOU W Q, SUN Y F, et al. Microstructure and properties of alloying ZG40Cr25Ni20 steel after solution treatment[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):903-906.

[10] 李欢,文九巴,贺俊光,等. Mg-Zn-Zr 系生物镁合金研究现状及展望[J].材料热处理学报,2019,40(7):1-9.

[11] 李华伟,毛萍莉.具有长周期有序堆垛结构的稀土镁合金研究进展[A].第十六届沈阳科学学术年会[C].沈阳,2019.

[12] 李建平,曾昭文,杨忠,等. Gd 对 ZK60 镁合金显微组织的影响[J].西安工业大学学报,2007(4):142-147.

[13] 王萍,李建平,马群. Gd 对 ZK60 铸造镁合金组织和耐蚀性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2008(6):1 056-1 059.

[14] 赵兵,韩少兵,贾长健,等. Gd 对心血管支架用 Mg-Zn-Gd-Zr 合金的腐蚀性能的影响[J].中国铸造装备与技术,2017(4):7-10.

[15] CHEN J X, TAN L L, YU X M, et al. Effect of minor content of Gd on the mechanical and degradable properties of as-cast Mg-2Zn-xGd-0.5Zr alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(4):503-511.

[16] 胡世平,陈乐平,周全,等.脉冲磁场对 AZ31 镁合金组织及压缩性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(5):556-559.

[17] WANG B, YANG Y S, SUN M L. Microstructure refinement of AZ31 alloy solidified with pulsed magnetic field[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(9):1 685-1 690.

[18] 周全,杨院生,马建超.脉冲磁场对 AZ91D 镁合金凝固组织的影响[J].铸造,2007,56(2):148-151.

[19] FU J W, YANG Y S. Microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn alloy under a low-voltage pulsed magnetic field[J]. Materials Letters, 2012, 67(1):252-255.

[20] 付浩,周全,谭水淋.机械振动对 AZ91D-3Ca 镁合金凝固组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2013,33(6):565-569.

(编辑:张正贺)

金钢理论最高使用温度可达 1 150 ℃,但是存在高温强度不足,易氧化、磨损和变形等问题。目前研究表明,通过添加 Al 可改善碳化物形态、细化晶粒和提高材料抵抗高温的能力<sup>[2~6]</sup>。另外,Ti、W 可在抗磨耐热钢中与 C 化合形成高硬度高稳定性的碳化物,提高硬度及耐磨性。而碳化物的形态和分布是影响其力学性能的重要因素之一<sup>[7]</sup>,一般一次相大颗粒对钢的性能不利<sup>[8,9]</sup>。因此,本课题在 ZG40Cr25Ni20 钢中加入适量的 Al、Ti、W,结合合适的热处理工艺,获得奥氏体基体上弥散均匀分布小颗粒化合物的组织,旨在提高其高温性能,为其使用提供参考。

## 1 试验材料及方法

在 ZG40Cr25Ni20 钢的基础上进行不同成分的优化,确定加入质量分数分别为 3%、5%、7% 的 Al,0.2%、0.6%、1.0% 的 Ti 和 0.2%、0.6%、1.0% 的 W。用中频感应电炉熔炼合金,采用水玻璃砂造型,浇注成标准 Y 型试样,在其下部截取试样,在 SX-10-12 箱式电阻炉内进行 1 200 ℃ 不同时间保温。对铸态及热处理后的试样进行组织分析及性能测试:在 HBE-3000A 布氏硬度计上进行硬度测试,在 SHIMAD(岛津)ZUAG-I250KV 型电子拉伸试验机上进行室温及 900 ℃ 高温拉伸试验,拉伸速度为 1 mm/min。在 ML-10 销盘型回转式磨料磨损试验机上进行耐磨性试验,磨料采用 100 号刚玉金相砂纸,每个试样磨损距离为 50 mm。

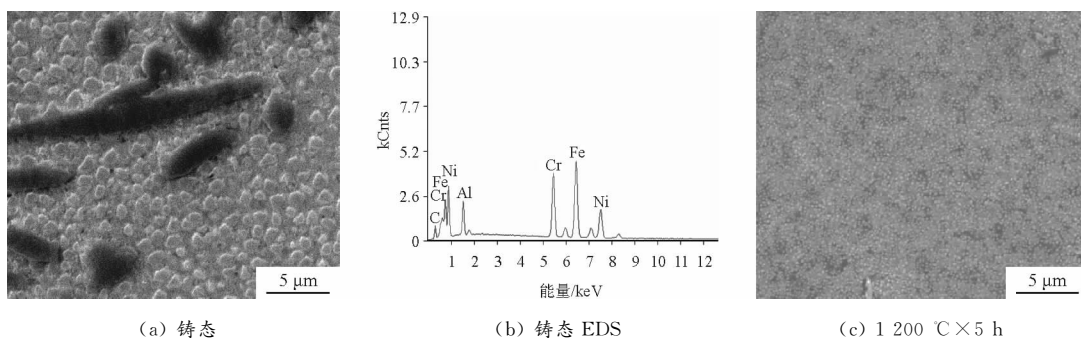


图 2 铸态及 1 200 ℃×5 h 油冷后的 SEM 形貌及能谱分析

Fig.2 SEM morphologies and energy spectrum analysis of as-cast and 1 200 ℃×5 h oil cooled specimens

时有部分断续分布短链状碳化物,多为三角形和近圆球形。对新生相的能谱分析发现,相成分中除了 Fe、Cr、Ni 和 C 元素外,含有较多的 Al,结合相的形状和分布规律,判定为  $\gamma'$  相。经 1 200 ℃×5 h 油冷后,组织中没有出现裂纹,尖角状化合物明显减少, $\gamma'$  相更为均匀细小,直径在 200 nm 左右。相对于 1 200 ℃×4 h 和 1 200 ℃×6 h,发现 1 200 ℃×5 h 时  $\gamma'$  相的分布最均匀,且当 1 300 ℃ 保温 2 h 后,钢发生软化,并出现过烧现象。因此确定热处理工艺为 1 200 ℃×5 h 油冷。

采用 AB204-N 型光电分析天平称量磨损质量损失,每个试样测量 3 次取平均值。用配有能谱仪的 Quanta200 扫描电镜进行组织的形貌观察和相成分分析,用 X'Pert Pro X-Ray 型衍射仪测定相组成,分析物相和性能之间的关系。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 Al、Ti、W 及热处理对 ZG40Cr25Ni20 钢组织的影响

图 1 为含 Al、Ti、W 的 ZG40Cr25Ni20 钢铸态的 XRD 图谱。可以看出,铸态组织主要由奥氏体基体和  $\text{Ni}_3\text{Al}$  相( $\gamma'$  相)组成。可能由于碳化物较为分散且含量较少,在 XRD 测试中没有检测到碳化物。

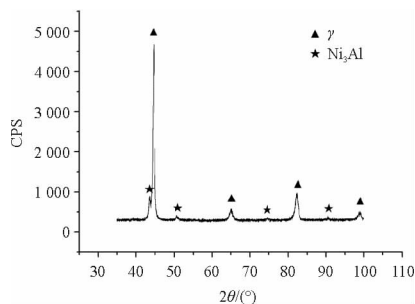


图 1 ZG40Cr25Ni20 钢铸态 XRD

Fig.1 XRD pattern of as-cast ZG40Cr25Ni20 steel

图 2 为铸态及 1 200 ℃×5 h 油冷 ZG40Cr25Ni20 试样组织形貌及能谱分析,可以看出,铸态组织为奥氏体基体上均匀分布着大量细小、圆颗粒状的化合物,同

### 2.2 Al、Ti、W 及固溶后 ZG40Cr25Ni20 的性能分析

#### 2.2.1 拉伸性能分析

图 3 为合金化后固溶态 ZG40Cr25Ni20 钢在室温及 900 ℃ 高温下的力学性能。可以看出,室温下,合金元素的加入使 ZG40Cr25Ni20 钢抗拉强度有所升高,但是伸长率显著下降。在 900 ℃ 高温下,抗拉强度均有所下降,但是合金化使 ZG40Cr25Ni20 钢伸长率显著提高,达 43.8%。

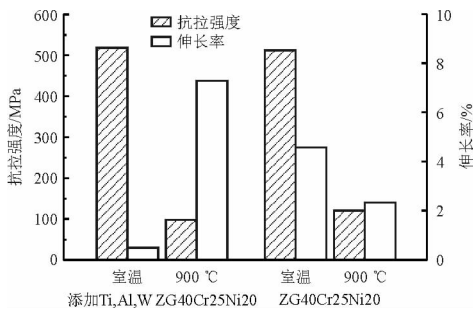


图3 不同状态下 ZG40Cr25Ni20 钢室温及 900 °C 下力学性能

Fig.3 Mechanical properties of ZG40Cr25Ni20 steel at room temperature and 900 °C under different conditions

图4为合金化后固溶态 ZG40Cr25Ni20 钢在室温和高温下的拉伸断口 SEM 形貌。由于合金元素的添加,合金室温下为典型的解理断口,宏观为“河流花样”,同时出现了较多的解理台阶,断面与拉伸面垂直,在靠近边缘的地方存在一些小裂纹,为断裂起源处,表现为脆性断裂,这与材料伸长率低相对应;由图 4b 可知,除了存在韧窝、颗粒状氧化物外,合金断口还出现了较多的撕裂棱,可见,该钢在高温时韧性较好。在试样的断口中出现了少量较深的孔洞,可能是有些较大的碳化物析出相在拉伸过程中被拔出留下的,该处碳化物与基体的结合较差也是高温强度下降的原因之一。

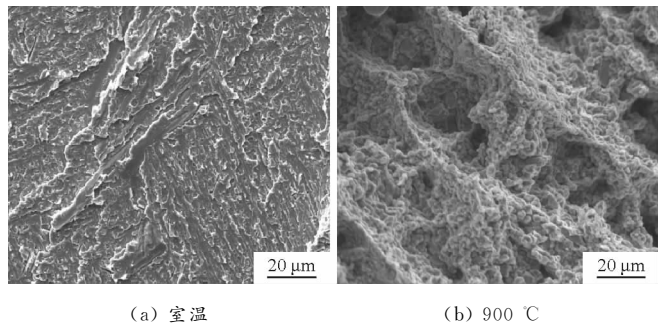


图4 合金化固溶态 ZG40Cr25Ni20 钢在室温及 900 °C 下的拉伸断口 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphologies of tensile fracture of alloying ZG40Cr25Ni20 steel after solution treatment at room temperature and 900 °C

### 2.2.2 硬度及耐磨性分析

图5为合金化 ZG40Cr25Ni20 钢铸态及经 1 200 °C 保温不同时间的试样硬度。由于 Al、Ti 和 W 加入,合金硬度有增大的趋势,原因是 Al 与合金中的 Ni 形成高硬度的 Ni<sub>3</sub>Al 相,而 Ti 和 W 与 C 的亲合力极强,在合金凝固过程中形成稳定性高的 TiC、WC 微粒,使 Cr 不易形成碳化物。这些硬度较高的 MC 型碳化物和金属间化合物相弥散分布在晶内,提高了其硬度。退火后材料的硬度进一步增大,这是由两方面的因素决定的:一是 Ni<sub>3</sub>Al 相更为均匀细小地分布在基体中;二是 CrC

的固溶温度低,而 TiC 和 Ni<sub>3</sub>Al 相的固溶温度较高,在 1 300 °C 以上高温固溶处理,仍不能充分溶解,所以,在 1 200 °C 保温时,C 能充分地 Ti 结合形成硬度高的 TiC,进一步提高了硬度,同时随着退火时间延长,硬度变化不明显。因此在 1 200 °C 保温 5 h 比较合适。

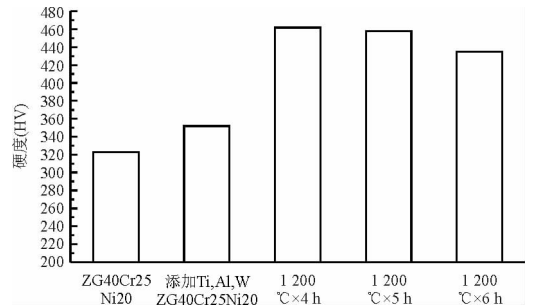


图5 不同状态试样硬度

Fig.5 Hardness of specimens under different conditions

高硬度限制了磨粒的压入深度,因而可明显减少材料在磨损过程中的能量积累,减薄表层流变和切削磨损的厚度。所以,提高硬度是获得高耐磨性的重要条件。但研究表明,耐磨性不仅与宏观硬度有关,还与基体组织以及碳化物的性质、形态、数量、大小和分布有关<sup>[10~12]</sup>。合金元素的加入对耐磨耐热钢性能有较大的提升。

对添加 Al、Ti、W 元素的 ZG40Cr25Ni20 固溶后试样进行了耐磨性试验,在 600 °C 干滑动摩擦条件下的磨损性能也进行了测定,见图 6。一般磨损质量损失越小,材料耐磨性越好。

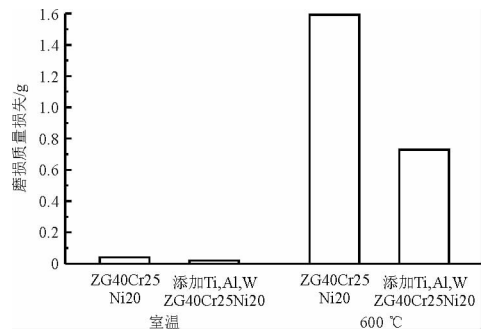


图6 添加 Al、Ti、W 元素的 ZG40Cr25Ni20 室温及 600 °C 干摩擦磨损质量损失

Fig.6 Wear loss of ZG40Cr25Ni20 with Al, Ti and W addition at room temperature and 600 °C dry friction

由图 6 可知,添加 Al、Ti、W 元素后,室温磨损质量损失仅为原来的 49.0% 左右,高温时仅为原来的 45.8% 左右,耐磨性均明显提高。试验钢的基体组织都是奥氏体,添加了 Ti、W 和 Al 元素,耐磨性受到碳化物硬质点和 Ni<sub>3</sub>Al 相影响。尤其 TiC 和 Ni<sub>3</sub>Al 相,具有很高的热稳定性和硬度,是面心立方结构,其晶格强度与晶格类型和奥氏体非常接近,所以能与奥氏体基体牢固结合,且弥散分布在奥氏体基体上,起弥散强化作用,提高了

基体的强度。碳化物和  $Ni_3Al$  相的数量增加、形态圆整、分布均匀及整体硬度的提高对耐磨性都有较好的促进作用。进一步观察磨损面形貌,分析其磨损机制,见图7。由图7可知,室温时,ZG40Cr25Ni20 钢磨损机理为微观切削磨损,磨损表面由大量的犁沟组成,同时在犁沟两侧发生了明显的塑性变形。这是由于在磨粒磨损过程中,作用在材料上的力有垂直压应力和水平拉应力,前者使砂纸磨粒压入基体表面,产生塑性变形,后者使磨粒与试样表面之间产生相对位移,磨粒与试样表面相互作用的结果使表面产生犁沟和微观切削磨损,并在表面留下沟槽。对比未添加 Al、Ti 和 W 元素的磨损形

貌可知,由于高硬度的 TiC、WC 和  $Ni_3Al$  相颗粒均匀弥散地分布在基体上,起到了支撑基体的作用,从而有效地减小了磨粒的压入深度,故添加 Al、Ti 和 W 元素后磨损面沟槽深度较浅。从 600 °C 干滑动摩擦条件下磨损形貌可知,试样的表面主要是氧化腐蚀磨损,伴随有氧化膜脱落和氧化物的磨粒磨损,同时还发现一些铸造缺陷和疲劳裂纹。结合磨损后表面的能谱分析发现,磨损表面成分中含有较多的氧,主要是 Fe 和 Cr 的氧化物,同时也有 Al 的氧化物,说明试样发生了氧化磨损。由于材料具有良好的抗氧化能力,加之磨损时间较短,所以氧化腐蚀磨损较少。

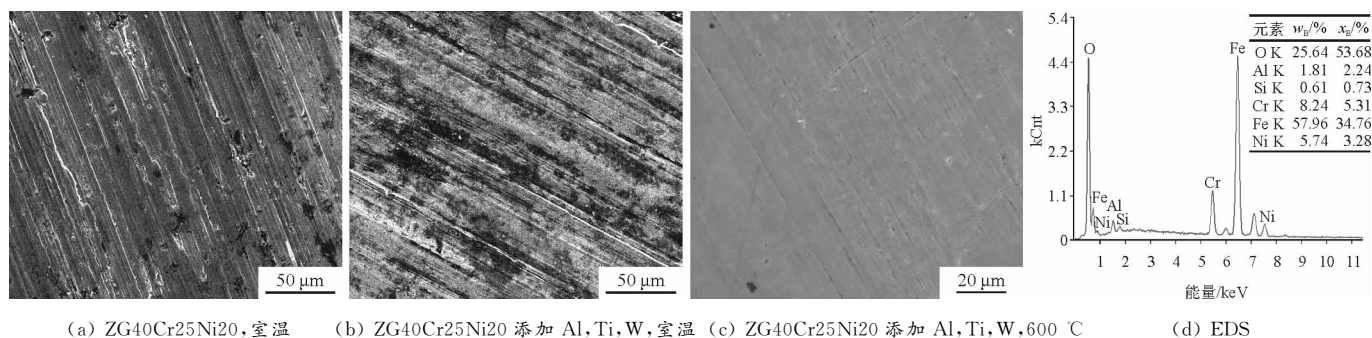


图7 ZG40Cr25Ni20 钢的磨损面 SEM 形貌及能谱分析  
Fig.7 SEM morphologies and EDS analysis of worn surface in ZG40Cr25Ni20 steel

### 3 结 论

(1) 添加 5% 的 Al、0.6% 的 Ti、0.6% 的 W 的 ZG40Cr25Ni20 奥氏体耐热钢固溶后其组织为: 奥氏体基体+大量细小、均匀、圆整的颗粒状化合物。

(2) 添加 5% 的 Al、0.6% 的 Ti、0.6% 的 W 的 ZG40Cr25Ni20 钢 1 200 °C × 5 h 油冷后室温抗拉强度有所升高,伸长率下降为未加入时的 11% 左右,合金断口表现为脆性断裂,而高温伸长率可达 43.8%,材料表现出较好的高温韧性。

(3) 在 ZG40Cr25Ni20 钢中加入 Al、Ti、W 后,组织中形成弥散分布的高硬度  $Ni_3Al$  相及 TiC、WC 微粒,使 ZG40Cr25Ni20 钢硬度有所提高。固溶后,分布更弥散,颗粒更细小,硬度进一步提高。

(4) Al、Ti、W 的加入使得固溶态 ZG40Cr25Ni20 室温及高温耐磨性均有所提高。

#### 参 考 文 献

[1] 鲍崇高,张西平. 高温工况下一种耐热磨新材料的组织及性能研究. [J]. 铸造技术,2001(4): 54-55.  
[2] 石淑琴,谷南驹,古原忠,等. 铝合金抑制超高碳钢中网状碳化物析出机理[J]. 材料热处理学报,2005, 26(4): 79-83.  
[3] 姜延飞,王宝奇,宋晓艳,等. 铝合金化对超高碳钢先共析碳化物析出行为的影响.[J]. 热加工工艺,2005, 44(2): 1-3.  
[4] 张炎,孙玉福,关绍康,等. Al 对 ZG40Cr25Ni20 耐磨性的影响[J].

特种铸造及有色合金,2008, 28(9): 677-679.

[5] 王豫,郑双七. 含铝超低 W、Mo 高速钢的组织性能[J]. 热处理, 2007, 22(2): 15-19.  
[6] 李国忠,曹红福,惠荣,等. 钛铝含量对低合金高强度钢 Q235D 低温韧性的影响[J]. 特殊钢,2002, 23(1): 53-54.  
[7] 高聿为. 热变形高铬铸钢颗粒碳化物的形成[J]. 金属热处理,2001, 36(5): 18-20.  
[8] LEEB S, OHY J, YOON J R, et al. Fracture properties of SA508-la ferritic steels and SA312-TP347 austenitic steels for pressurized water reactor's (PWR) primary coolant piping[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 1(2): 113-123.  
[9] 王敬忠,刘正东,程世长,等. 固溶温度对 S31042 耐热钢微观组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理,2001, 36(2): 79-82.  
[10] TORRANCE A A. Modelling abrasive wear[J]. Wear, 2005, 258(2): 281-293.  
[11] WILLIAMS J A. Laboratory simulation of abrasive wear[J]. Tribology, 1997, 3(3): 267-306.  
[12] 徐流杰,魏世忠,邢建东,等. 高碳化物铁碳合金的磨粒磨损性能研究[J]. 金属热处理,2006, 31(12): 37-39.

(编辑:刘卫)

欢迎使用在线稿件处理系统  
**投稿、查稿、审稿**  
敬请登录 [www.special-cast.com](http://www.special-cast.com)